



# ***Energía Nuclear***

**Julio Vergara Aimone**



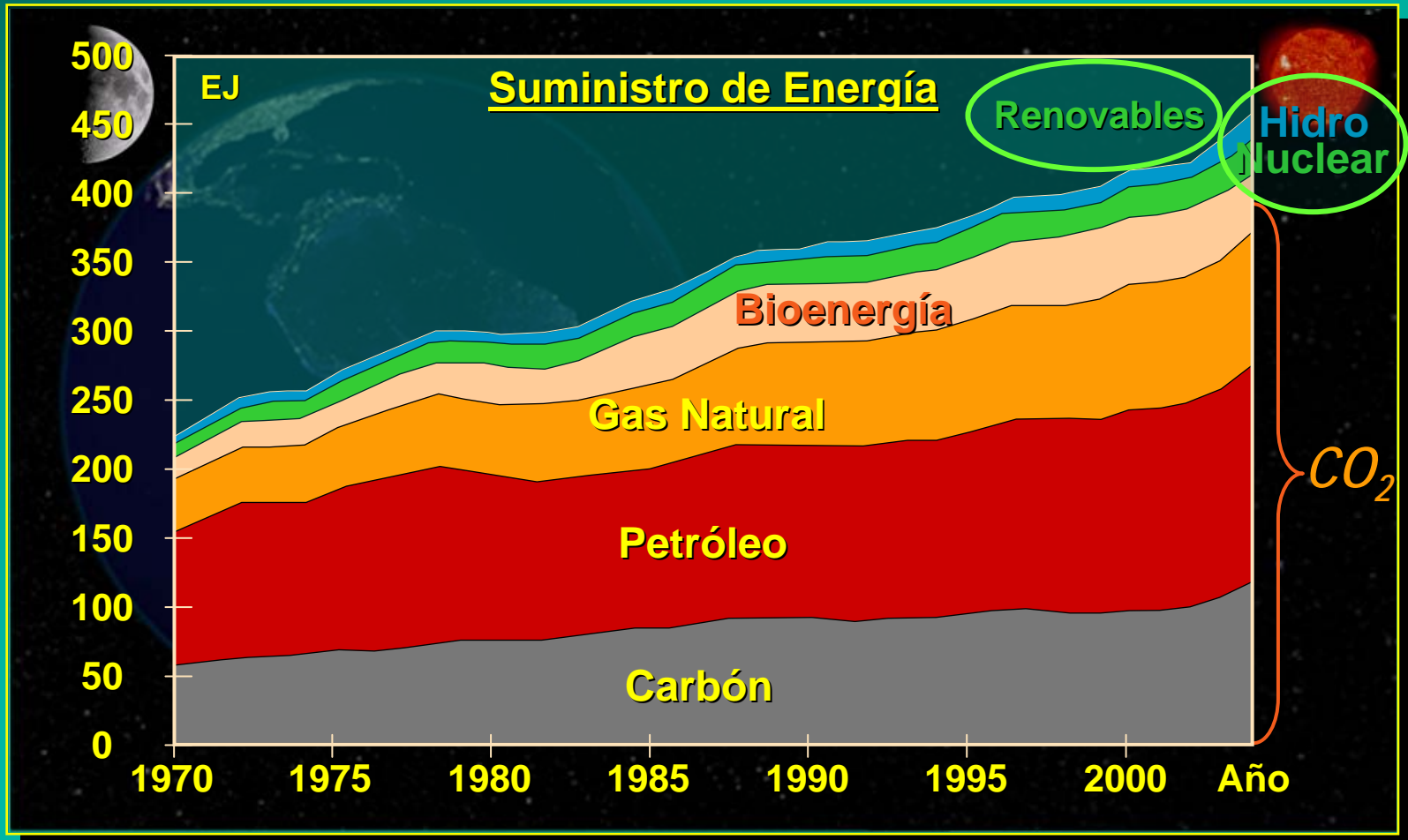
***Santiago, 7 de Marzo del 2007***



# Introducción



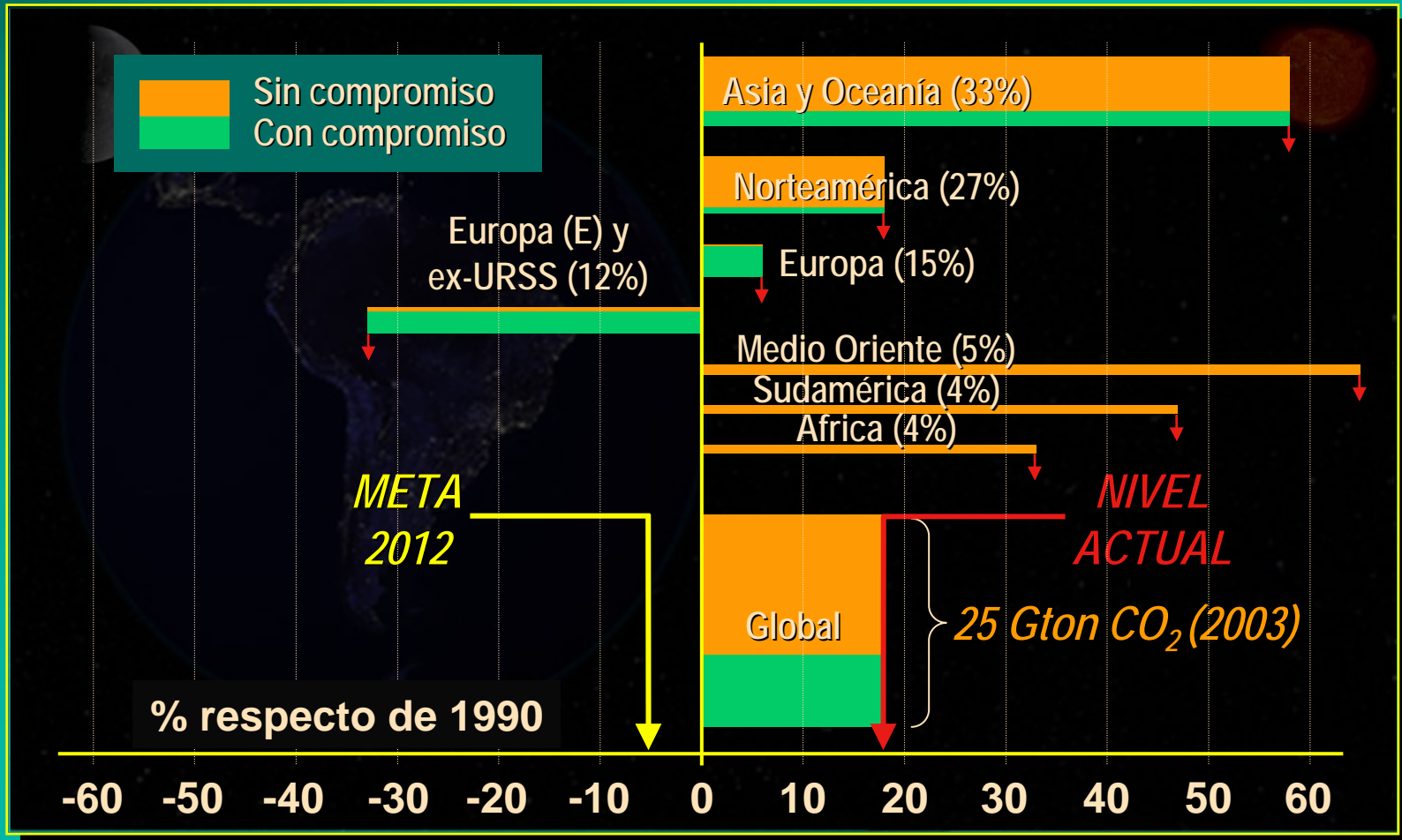
**Combustibles fósiles = 3/4 de la producción total**





# Introducción

## Respuesta global actual al Protocolo de Kioto



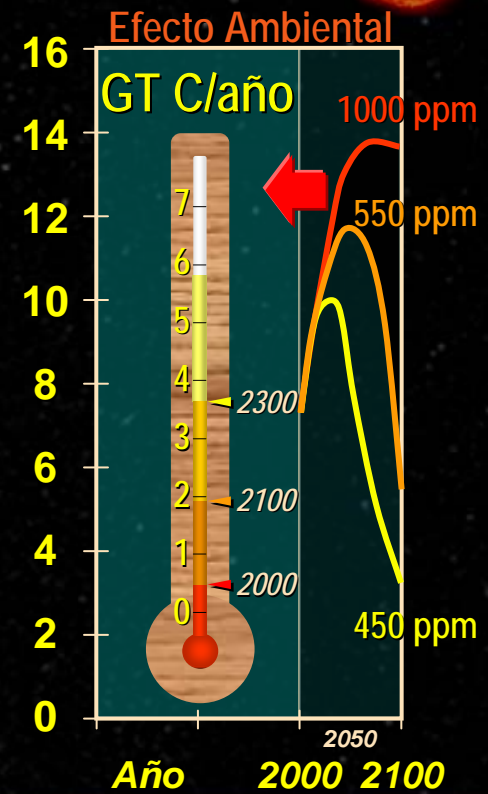
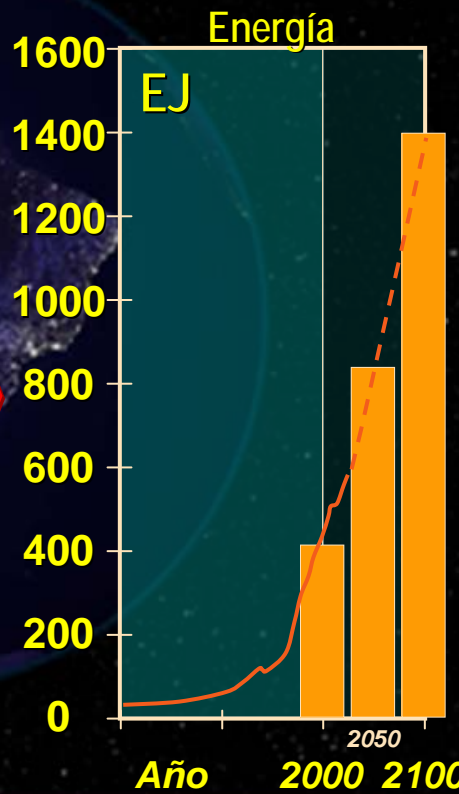
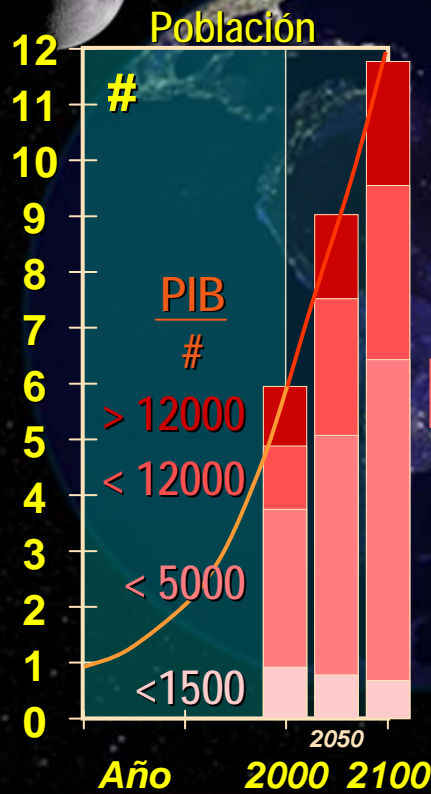


# Introducción



La demanda energética tenderá a crecer más

*“población → consumo → efectos”*



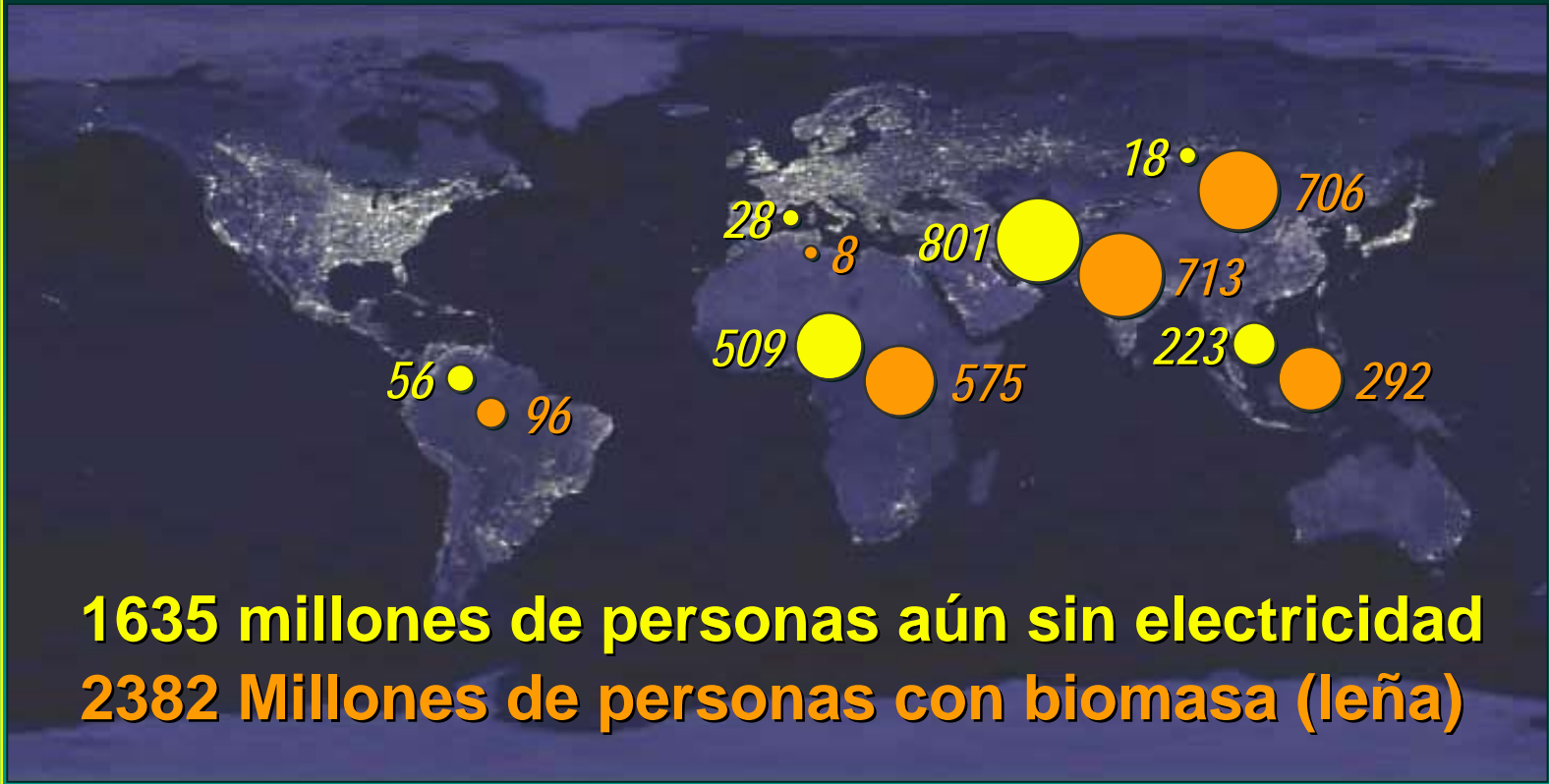


# Introducción



**Y si a esto sumamos a los que no tienen energía**

## Desigualdad del consumo energético global



**1635 millones de personas aún sin electricidad**  
**2382 Millones de personas con biomasa (leña)**



# Introducción



## Integrando más efectos sobre el ecosistema

### *Posibles efectos (algunos):*

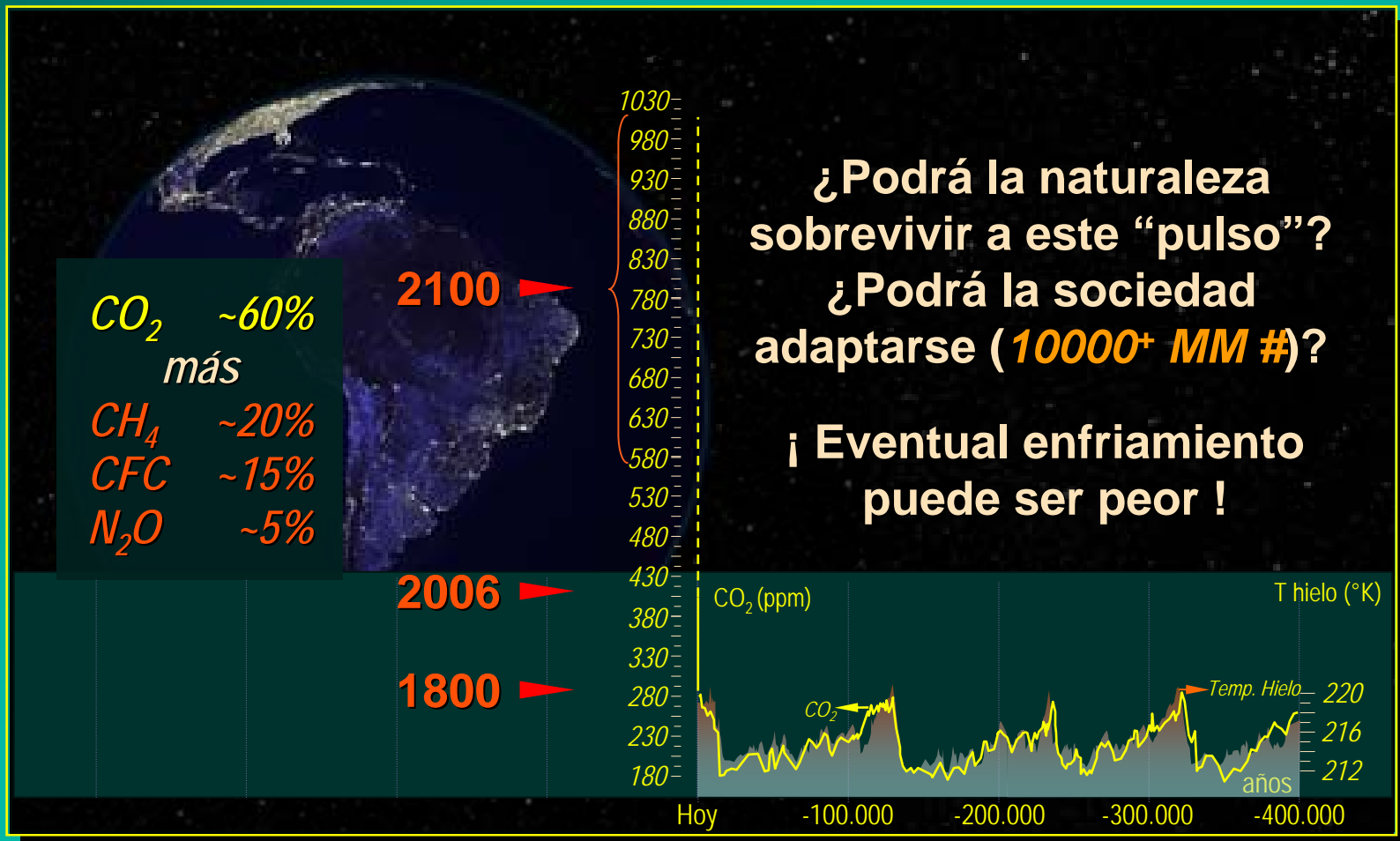
- *Alza de temperatura, humedad y lluvias.*
- *Degradación del permafrost.*
- *Emisión de metano retenido.*
- *Desplazamiento de la vegetación.*
- *Cambios en especies, unas por otras.*
- *Derretimiento de glaciares y hielos.*
- *Aumento del nivel del mar.*
- *Baja de salinidad en zonas críticas.*
- *Posible falla de corrientes termohalinas.*
- *Posible enfriamiento abrupto.*



# Introducción



## La alteración climática supera los ciclos naturales





# Introducción



**Energía nuclear debe aumentar su aporte**

*We can not continue drawing energy from fossil fuels and there is no chance that the renewables can provide enough energy and in time. If we had 50 years or more we might make these our main sources. But we do not have so.*

*Let us use the small input from renewables sensibly, but only one immediately available source does not cause global warming and that is:*

**Nuclear Energy**

**James Lovelock**  
**Autor de la Teoría GAIA**

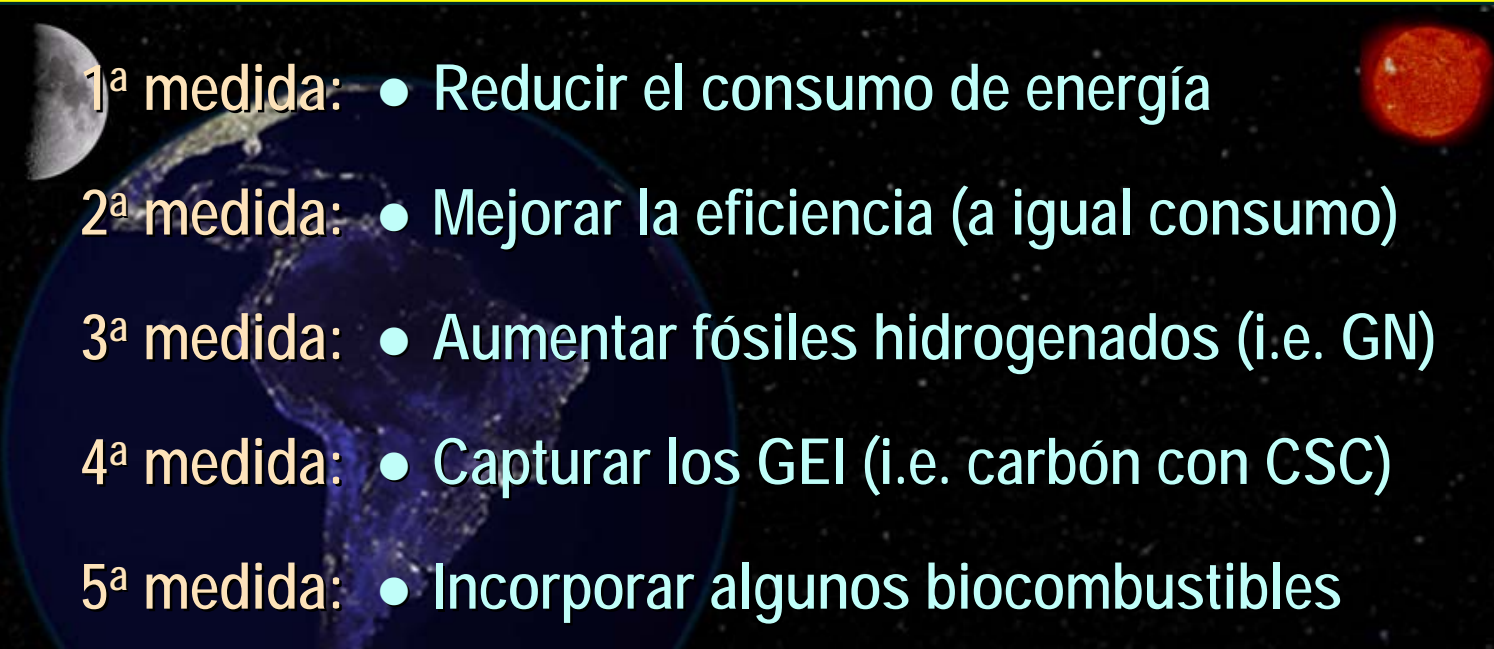




# Energía Nuclear

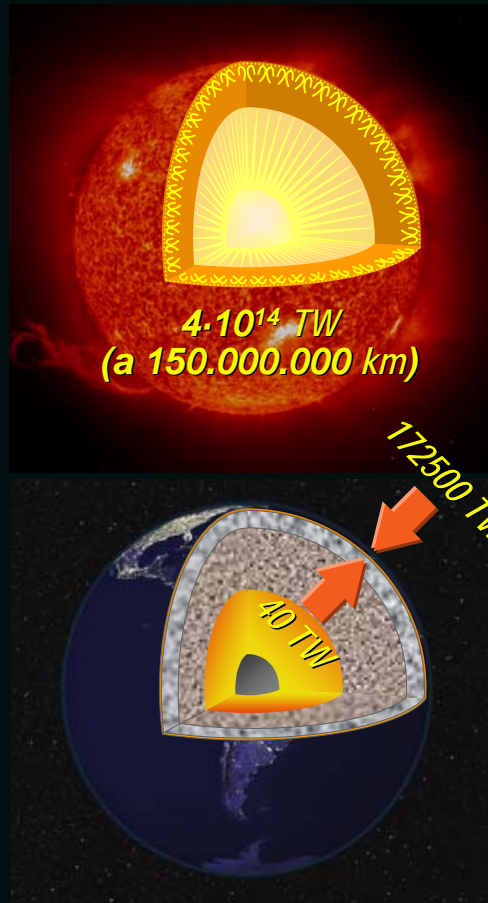


## Medidas para mejorar la sustentabilidad

- 
- 1ª medida: ● Reducir el consumo de energía
  - 2ª medida: ● Mejorar la eficiencia (a igual consumo)
  - 3ª medida: ● Aumentar fósiles hidrogenados (i.e. GN)
  - 4ª medida: ● Capturar los GEI (i.e. carbón con CSC)
  - 5ª medida: ● Incorporar algunos biocombustibles
  - 6ª medida: ● **Reducir el carbono (i.e. H<sub>2</sub>)**
  - 7ª medida: ● **Incorporar más fuentes sin GEI**



## Energía nuclear ..... desde el inicio



- **Fusión nuclear :**  
“energía externa”  
*Estimula la hidrología, el viento, las olas, provee energía FV, fósiles, etc...*

- **¿¿ Fisión ?? nuclear :**  
“energía terrestre”  
*Estimula la energía geotérmica ... de paso activa un geodínamo protector.*



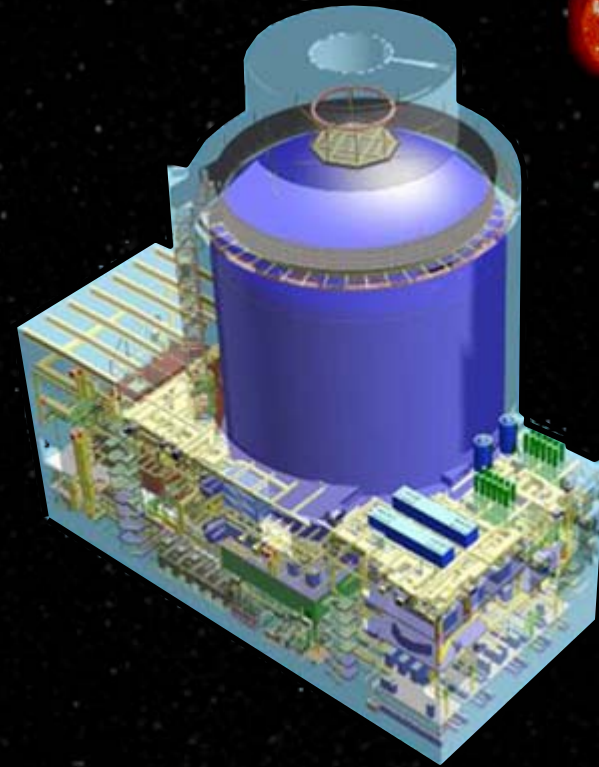
# Energía Nuclear



440+ reactores generan 6% de la energía primaria



**Fusión**



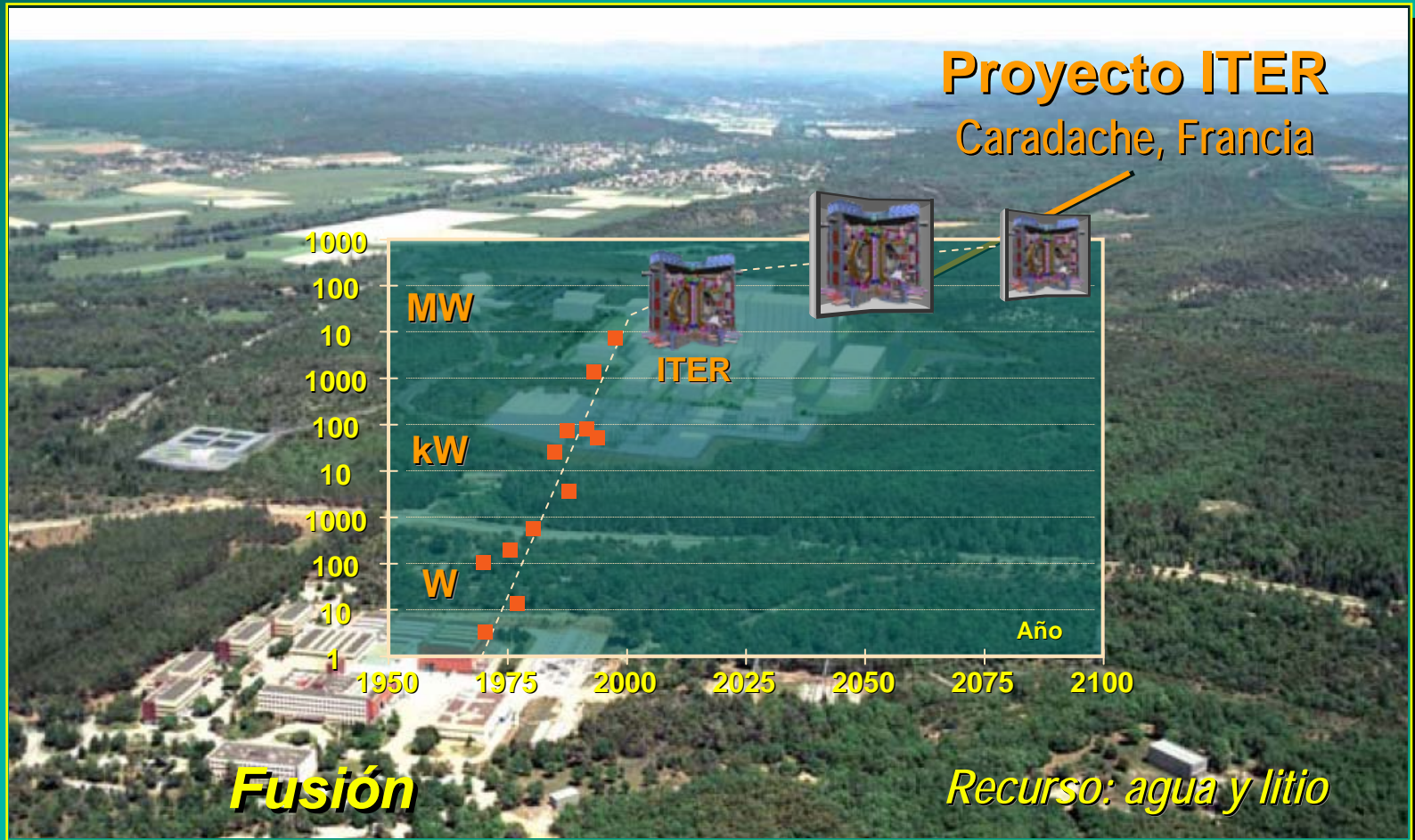
**Fisión**



# Energía Nuclear



Con autonomía indefinida a muy largo plazo





# Energía Nuclear



## Y buenas perspectivas al mediano plazo

**Olkiluoto 3**  
1600 MW, Finlandia

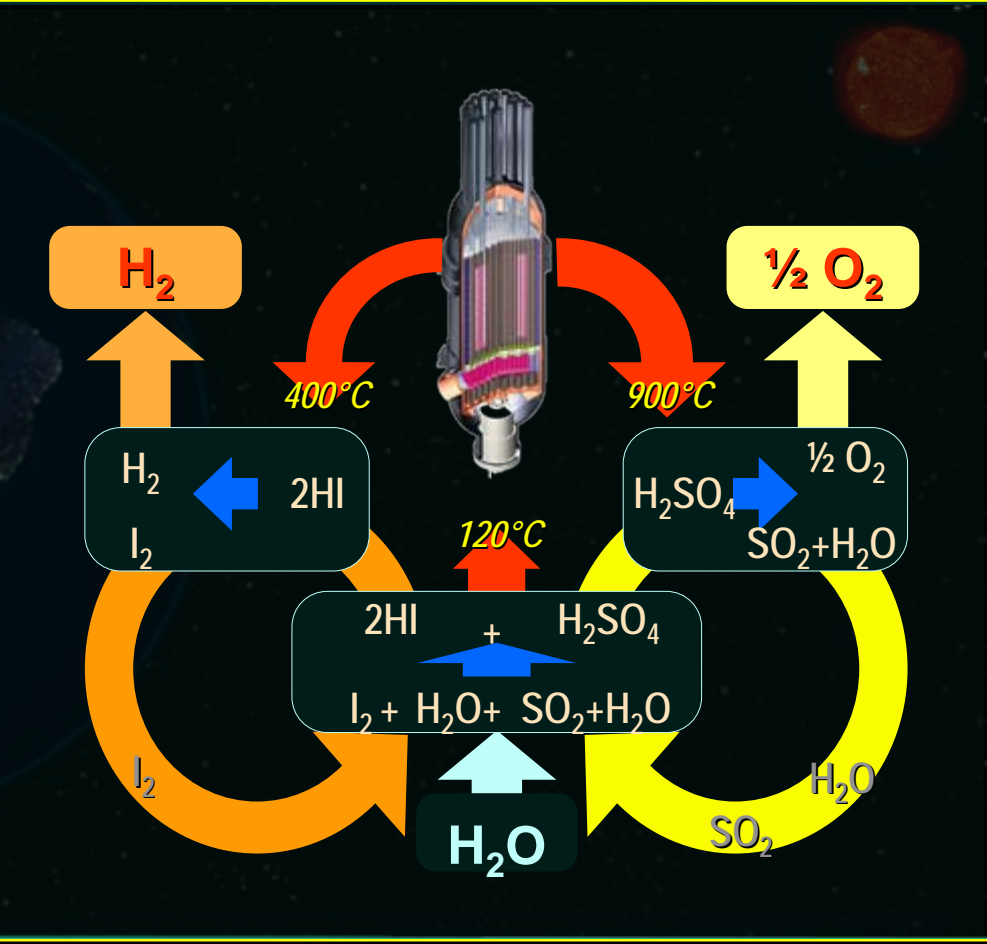


# Energía Nuclear

Con posibilidades más allá de la electricidad



VHTGR = 7-12 \$/GJ  
 Carbón = 6-12 \$/GJ  
 SRM = 7-10 \$/GJ  
 Otros = 9-30 \$/GJ

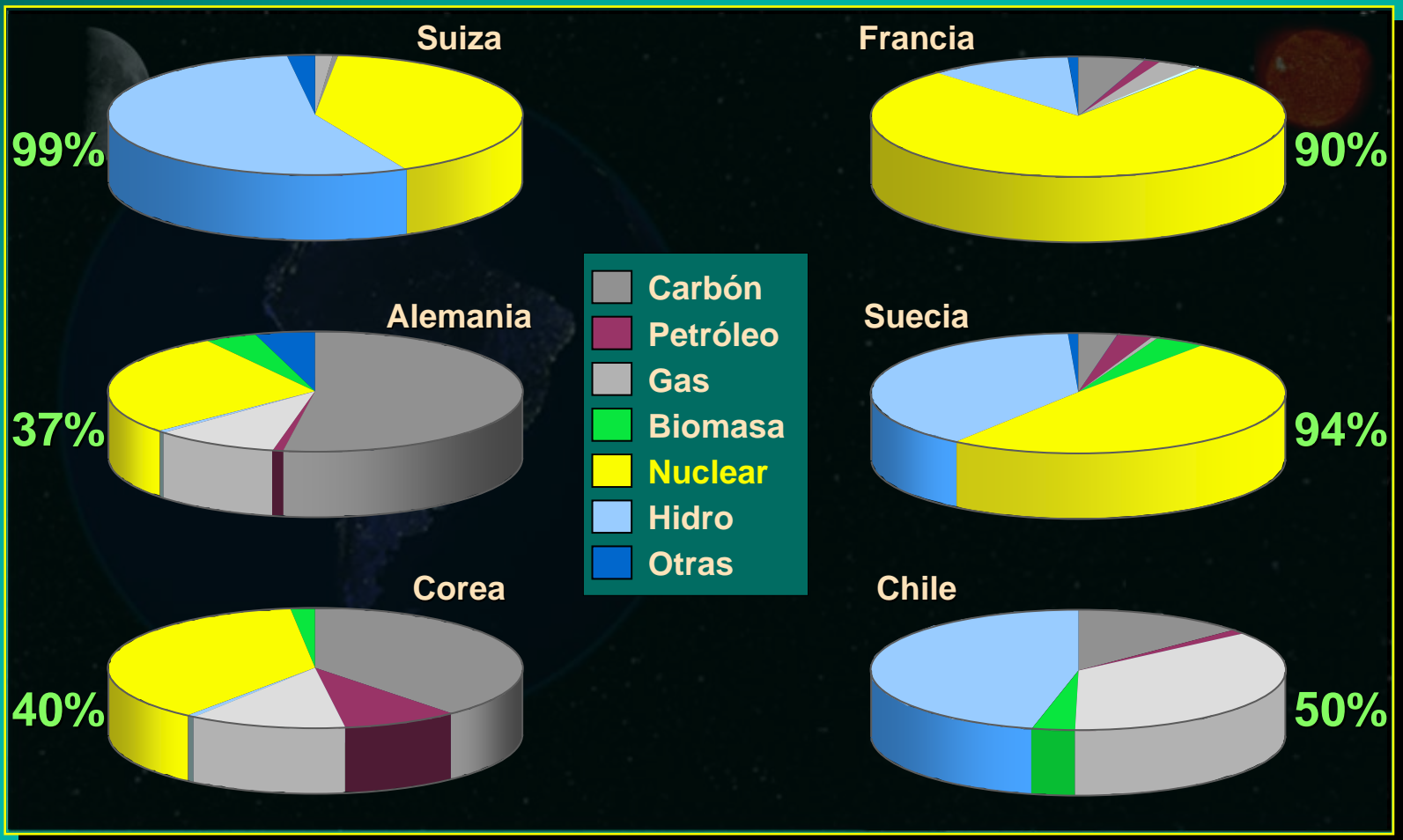




# Energía Nuclear



Cada país con su fórmula electricidad-ambiente





# Energía Nuclear



## Nueva tendencia: “renacimiento nuclear”

- Problemas de seguridad internacional,
- Creciente costo de los combustibles fósiles,
- Buen desempeño de la tecnología nuclear,
- Extensión de vida y aumento de potencia,
- Comprensión sobre Chernobyl (20 años),
- Costo y escala de opciones renovables,
- Amenaza de cambio climático abrupto,
- Costos e impactos globales (Stern Review)
- Ambientalistas a favor de esta opción,
- Países líderes (EUA, UK, G8, Australia, etc.),
- Resultado: **130 posibles reactores al MP.**





# Energía Nuclear

**Energía nuclear ofrece oportunidades amplias**



**Electricidad**, libre de CO<sub>2</sub>  
**Calor** industrial y urbano

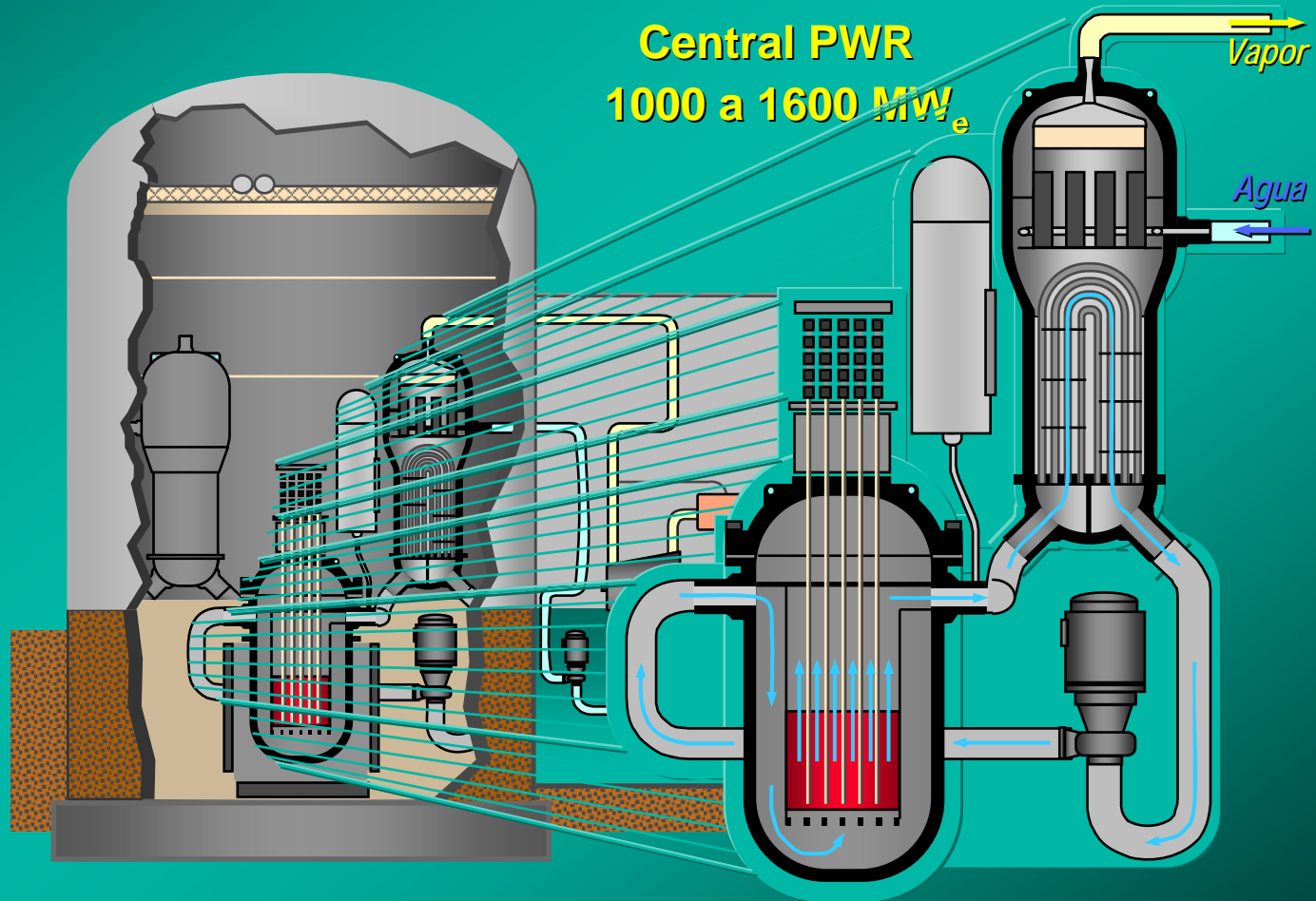
**Producción de H<sub>2</sub>** (autos)  
**Propulsión** de naves

**Desalinización** por osmosis,  
destilación, híbridos, etc.

**Tecnología**, materiales, co-  
nocimiento, servicios, etc.

# Centrales Nucleares

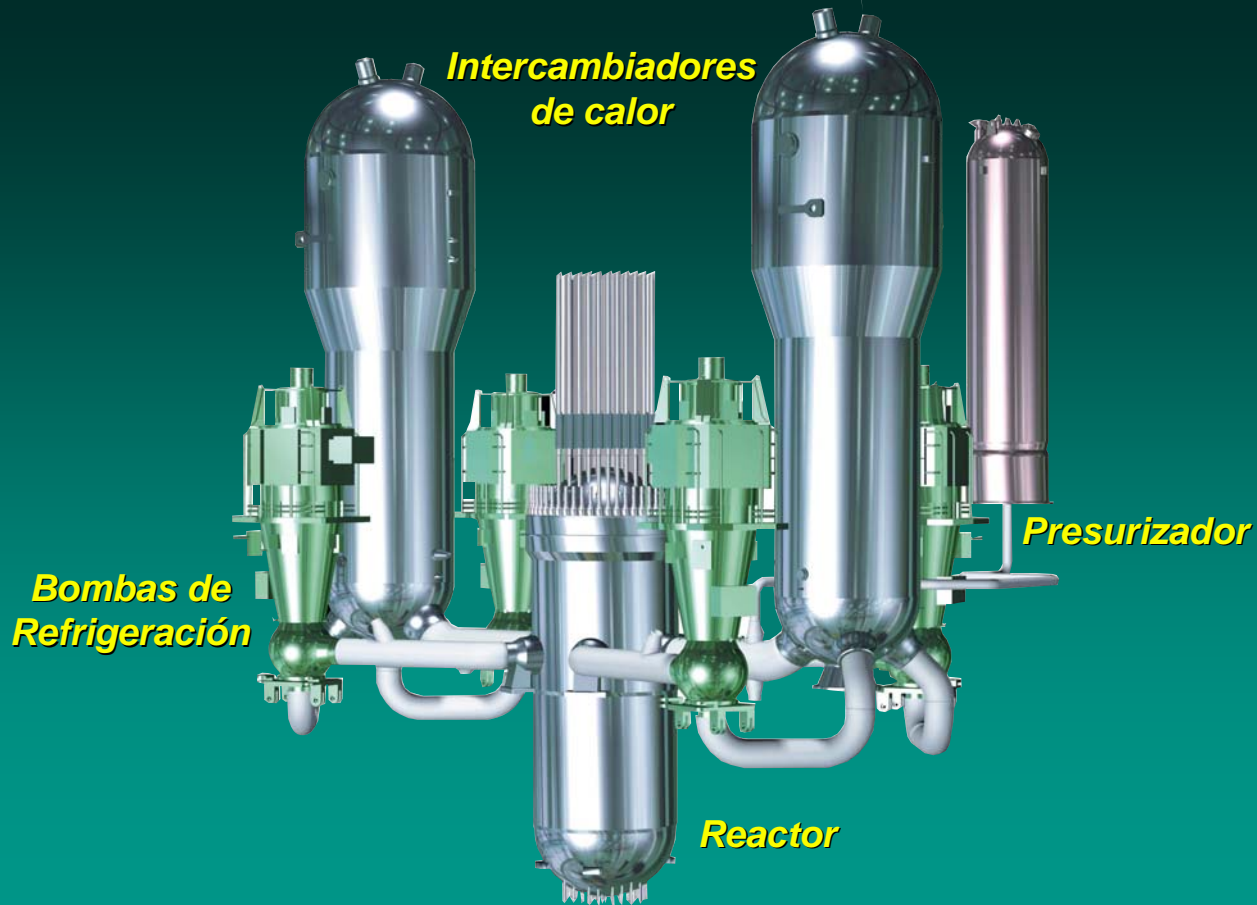
Diseño dominante en tecnología nucleoelectrica





# Centrales Nucleares

## Reactores de última generación





# Centrales Nucleares

## Reactores de última generación





# Centrales Nucleares



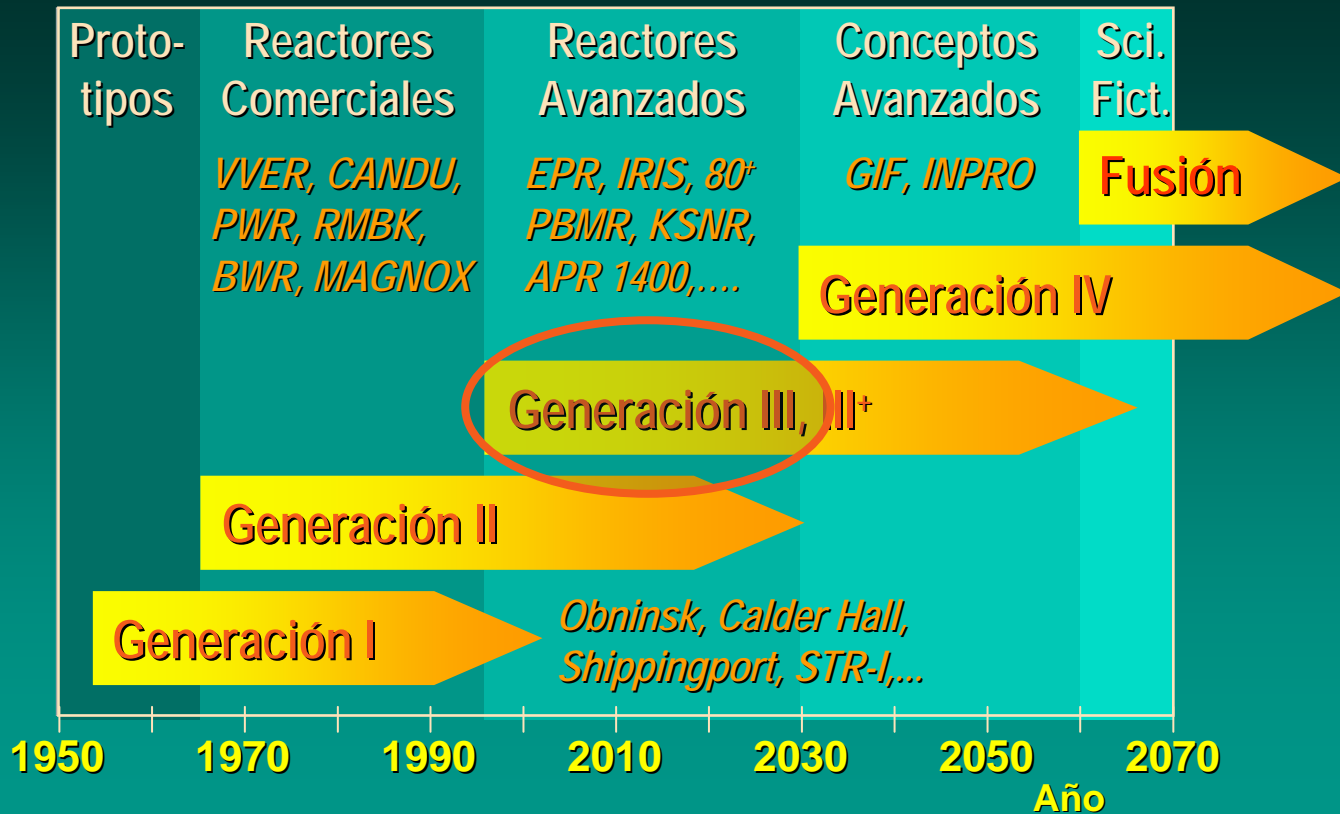
## Reactores nucleares en operación, por tipo

Tipo de Reactor	Países	#	GW	Combustible	Refrigerante	Moderador
Agua a presión (PWR-VVER)	EUA, Francia, Japón, Rusia	267	242	UO <sub>2</sub> (LEU)	Agua	Agua
Agua en ebullición (BWR)	EUA, Japón, Suecia	94	84	UO <sub>2</sub> (LEU)	Agua	Agua
Agua pesada a presión (PHWR-CANDU)	Canadá, India, Corea, China, Argentina	41	21	UO <sub>2</sub> (natural), UO <sub>2</sub> (SEU)	Agua pesada	Agua pesada
Gas-grafito (GCR, AGR & Magnox)	Reino Unido	22	11	U (natural), UO <sub>2</sub> (LEU)	CO <sub>2</sub>	Grafito
Agua a presión y grafito (LWGR)	Rusia	16	11	UO <sub>2</sub> (LEU)	Agua	Grafito
De espectro rápido (FBR)	Japón, Rusia, Francia	3	1	PuO <sub>2</sub> y UO <sub>2</sub>	Sodio líquido	No
	TOTAL	443	370			



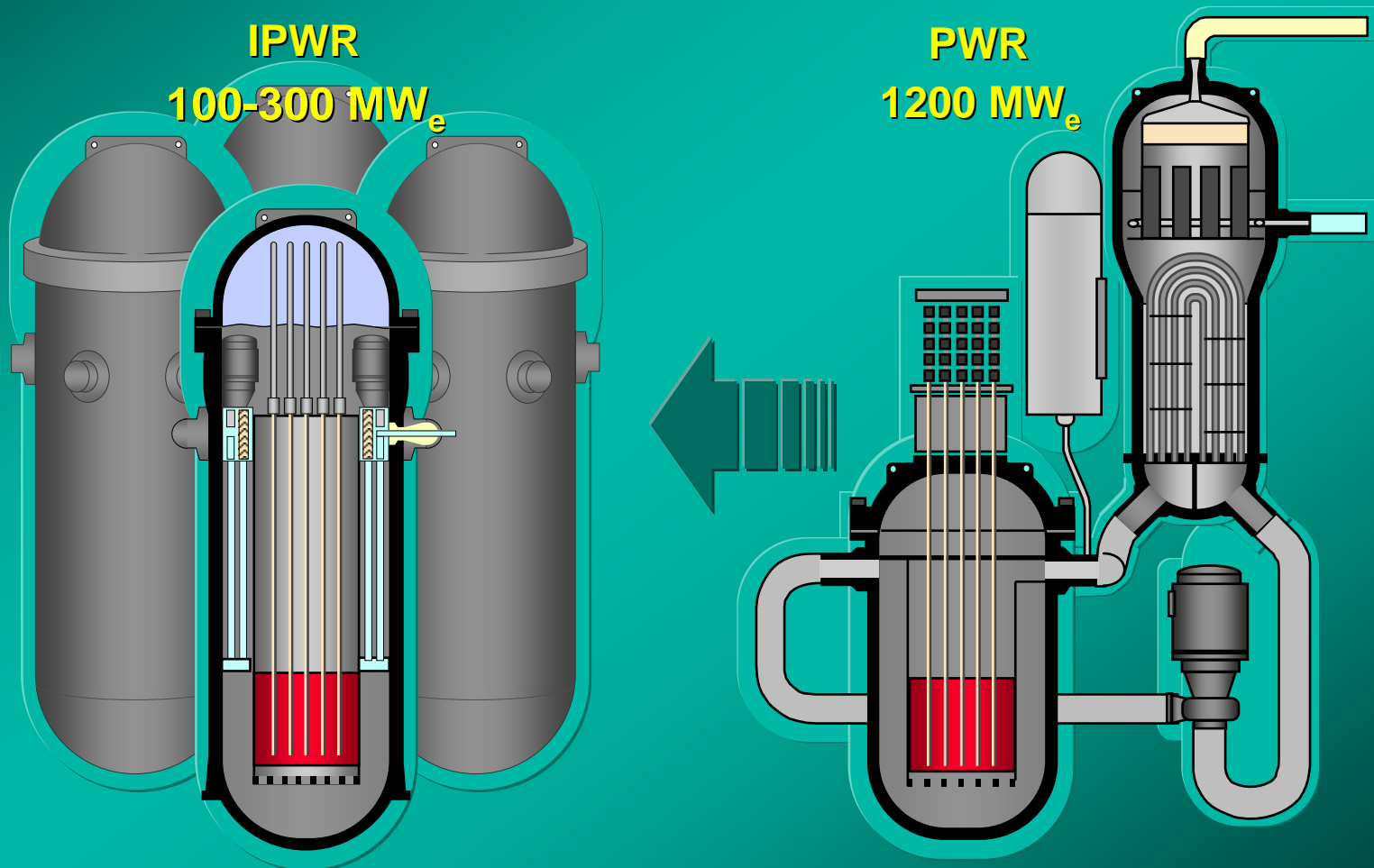
# Centrales Nucleares

## Evolución de la tecnología nuclear dominante



# Centrales Nucleares

**El IPWR cumpliría nuevos requisitos de diseño**

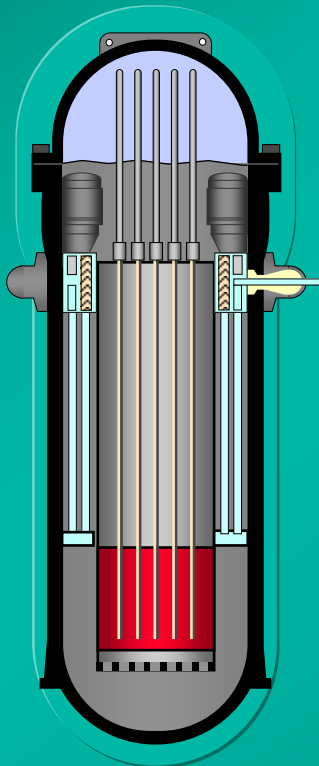


# Centrales Nucleares



**Similarmente eficiente, pero más competitivo**

**IPWR**



**PWR Integral**, apto para redes pequeñas:

- **Más resistente a sismos.**
- **Mejor seguridad nuclear.**
- **Mejor confinamiento.**
- **Mejor rendimiento térmico.**
- **Menos circuitos y sistemas.**
- **Fácil de montar y desarmar.**
- **Etc...**

**+ SEGURO, + SIMPLE, + BARATO**

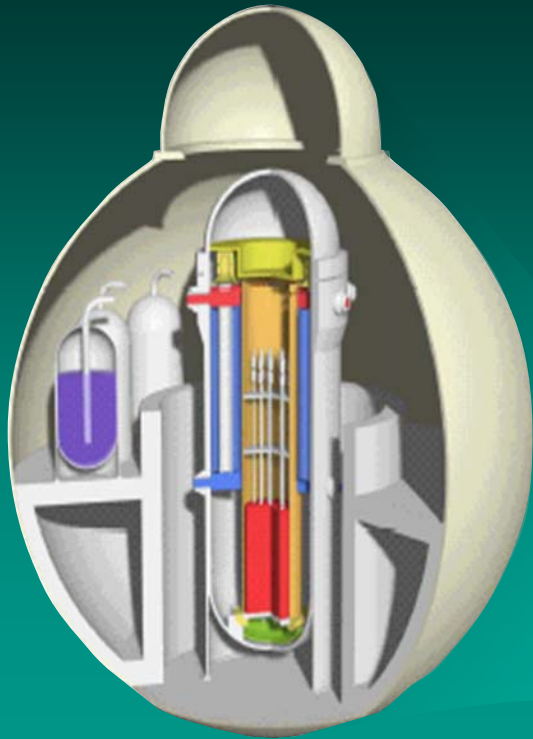




# Centrales Nucleares

De dimensiones relativamente compactas

Ejemplo: Reactor IRIS



**5 MW**

$\phi$  126 m  
7-12 rpm

400 ton

300 ton

120 m

1300 m<sup>3</sup> concreto  
120 tons de acero

**335 MW**



# Centrales Nucleares

Capacidad para entregar potencia y calor

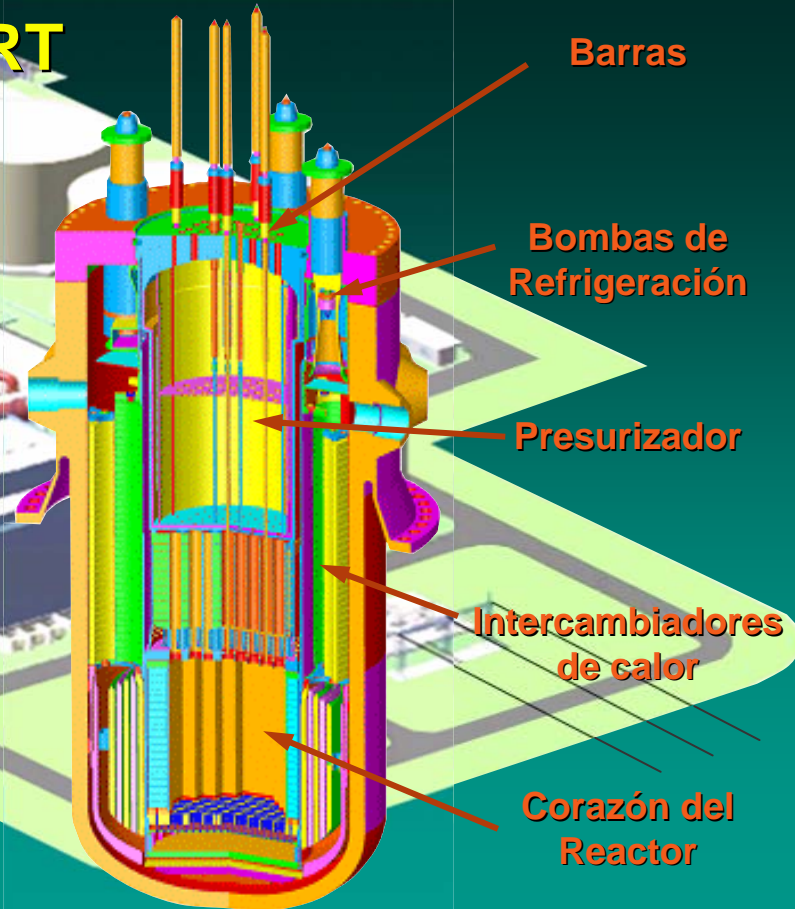
## Ejemplo: Reactor SMART

Planta  
Desalinizadora

Planta  
Generadora

$200 MW_e$

$180 MW_e + 80000 \text{ Ton/día}$

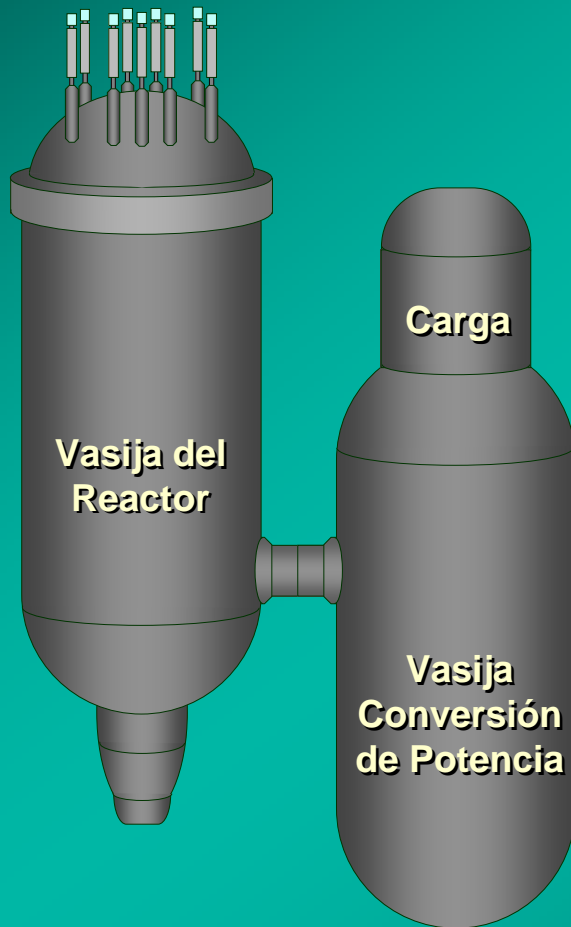




# Centrales Nucleares



## El HTGR-ICR cumpliría mejor los requisitos



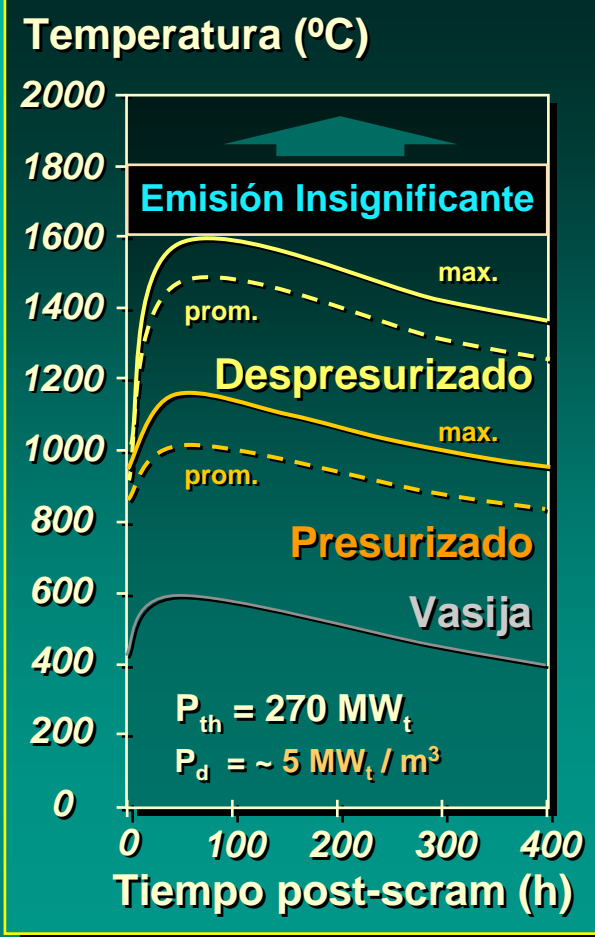
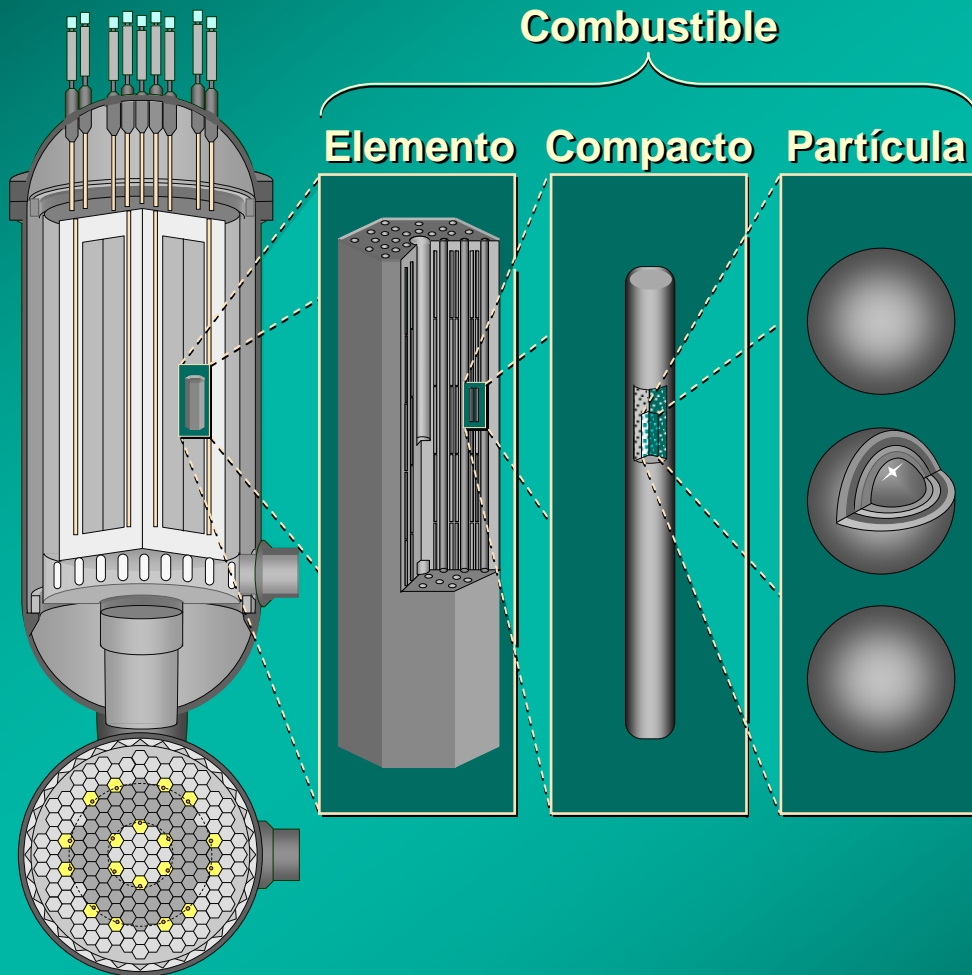
Este tipo también sería apto para tales redes + calor:

- **Mayor seguridad nuclear.**
- **Excelente eficiencia.**
- **Calor industrial de calidad.**
- **Componentes estándares.**
- **Menos sistemas auxiliares.**
- **Gestión de Combustible.**
- **Etc...**

**++ SEGURO, ++ SIMPLE, ++ BARATO**

# Centrales Nucleares

## El HTGR-ICR cambia el paradigma de la seguridad

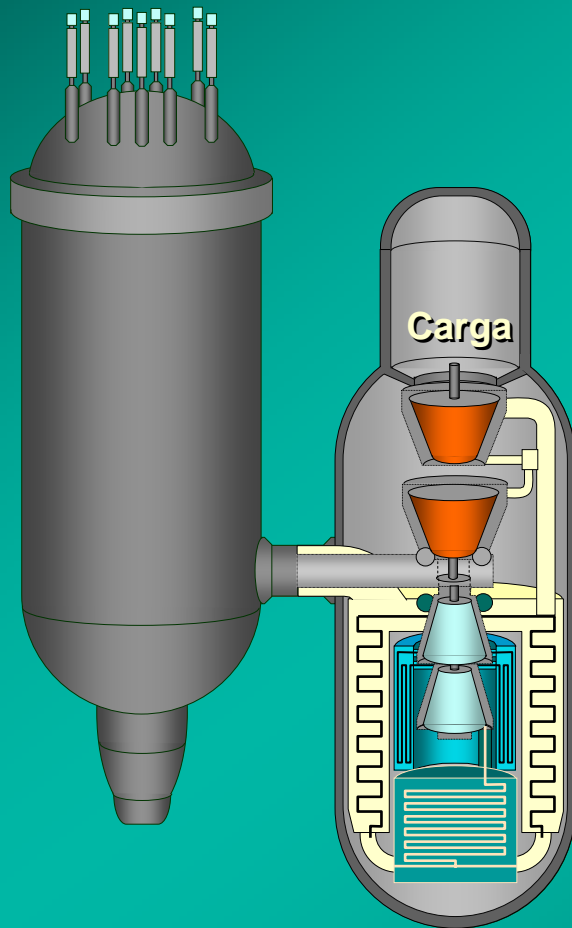




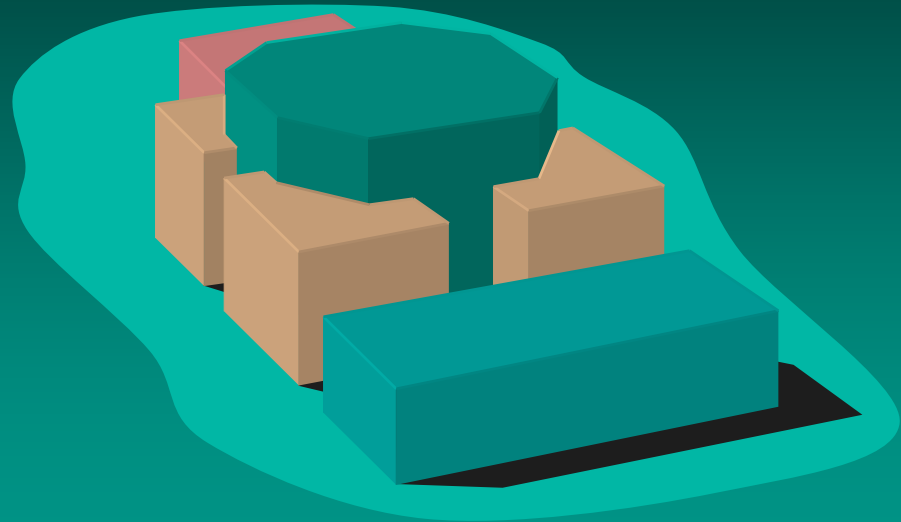
# Centrales Nucleares



**El HTGR-ICR se perfila aún más competitivo**



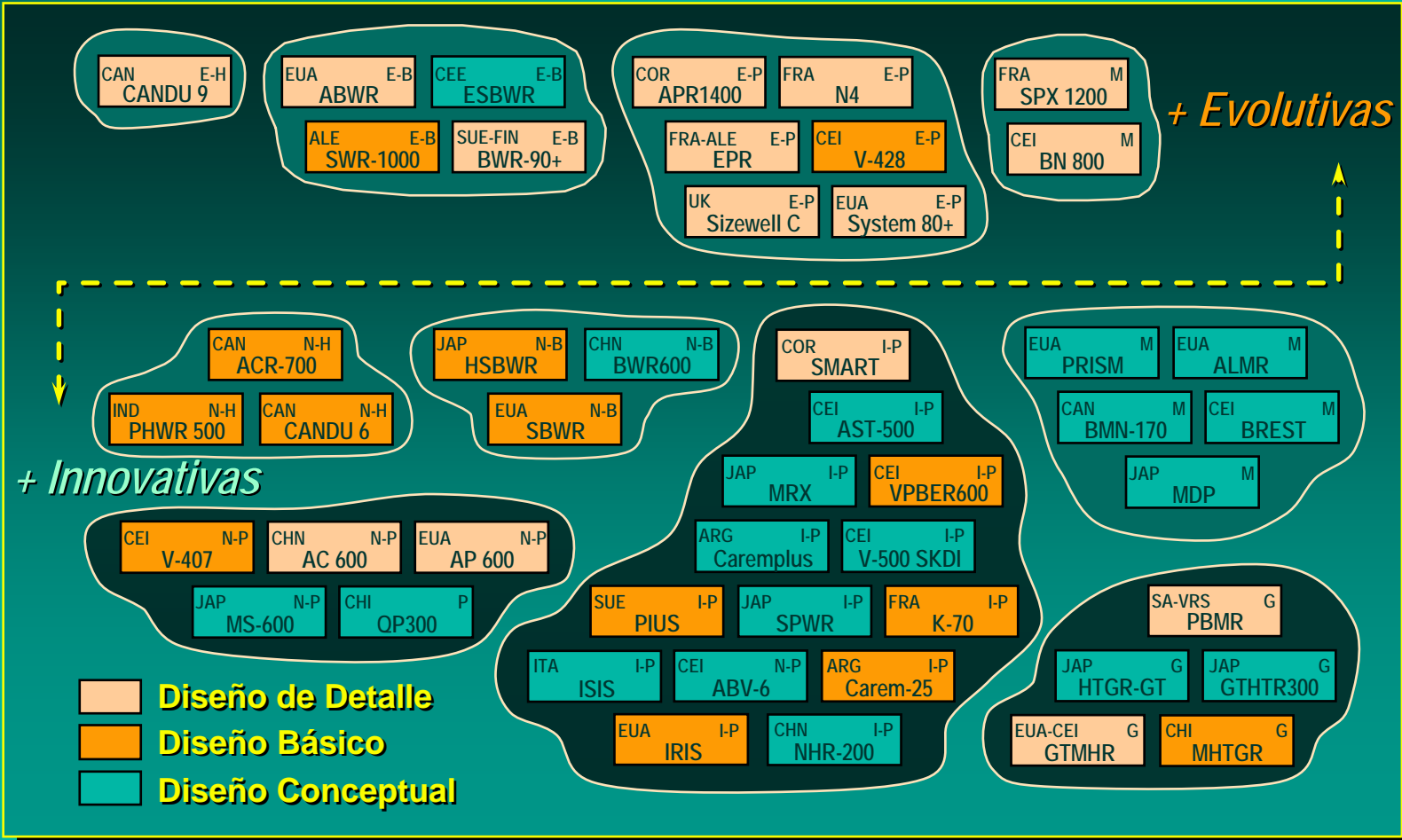
**Central de tamaño pequeño  
(i.e. 4 x 286 MWe)**





# Centrales Nucleares

Hay múltiples opciones de reactores avanzados





# Centrales Nucleares



## Ventajas generales de la energía nuclear

La energía nuclear es una opción más, con fortalezas y debilidades en el marco del desarrollo sustentable. En particular:

- Diversifica una matriz energética,
- Emite muy pocos GEI (indirecto),
- Estabiliza el precio de energía base,
- Asegura energía en el largo plazo,
- Aporta diversas tecnologías.



# Centrales Nucleares



La disponibilidad explica parte de los costos

La potencia eléctrica instalada en el Mundo es de ~ **3500 GW**:

Fósil	~ 2300 GW	~ 10320 TWh	51%
Hidro	~ 680 GW	~ 2500 TWh	42%
Nuclear	~ 370 GW	~ 2630 TWh	<b>81%</b>
ERNC	~ 160 GW	~ 550 TWh	39%

Minihidro	~ 61 GW
Eólico	~ 48 GW
Biomasa	~ 39 GW
Geotermia	~ 9 GW
Solar directo	~ 4 GW
Mareomotriz	~ 0.3 GW

↑  
Energía

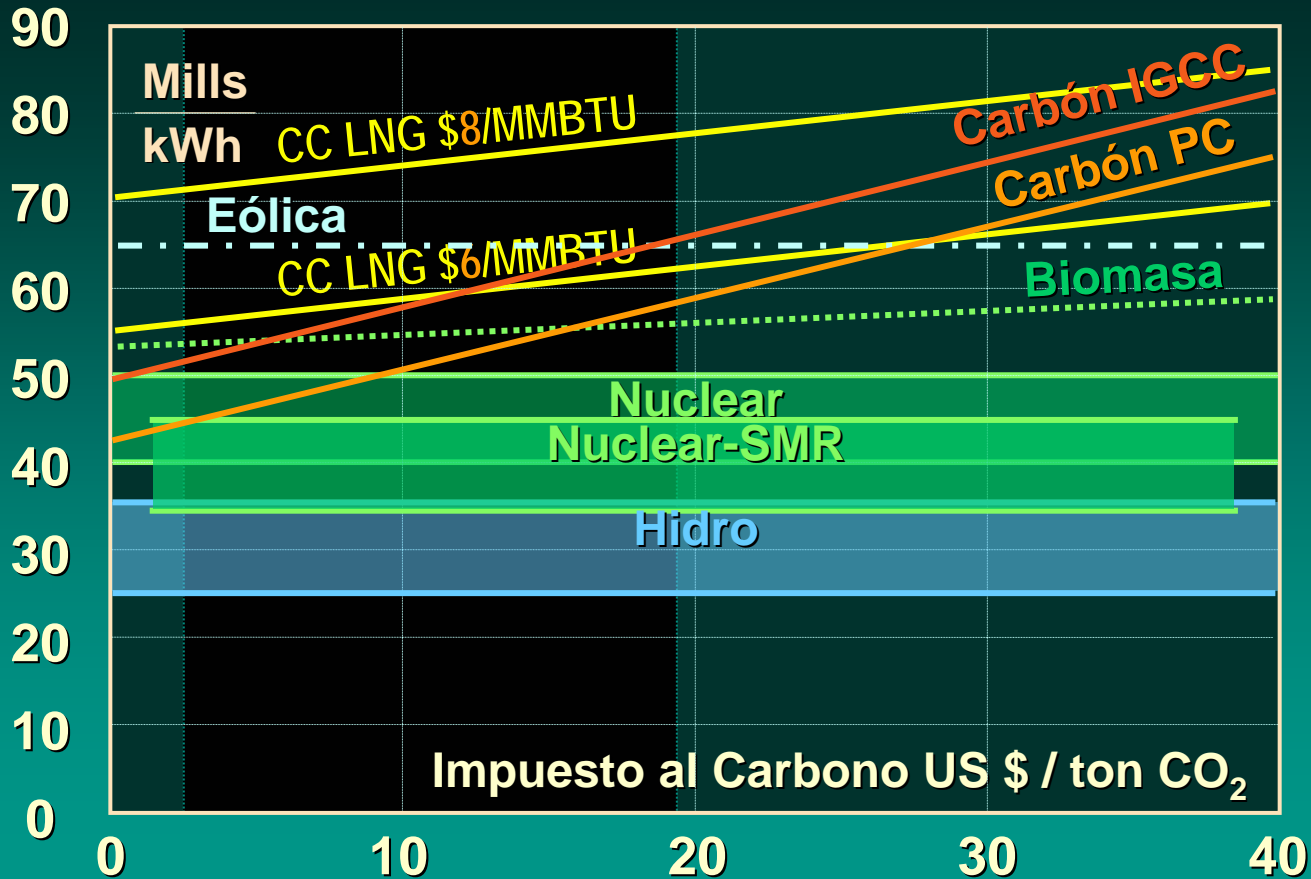
↑  
Uso





# Centrales Nucleares

## Costo comparado de opciones de generación





# Centrales Nucleares



**Sujeto a desventajas que requieren previsiones**

**Presenta diversos problemas, reales y/o aparentes, que hasta ahora han frenado su desarrollo efectivo. En particular:**

- **Riesgo de accidente nuclear.**
- **Relación con proliferación de armas a través del combustible.**
- **Productos radiactivos de la fisión.**
- **Genera elementos pesados radio-tóxicos y persistentes (pocos).**



# Centrales Nucleares



## Entradas y salidas de dos plantas generadoras

### Fósil (600 MW<sub>e</sub>)

**Alimentación**  
1.600.000 T

**Desechos anuales**  
3.100.000 T CO<sub>2</sub>  
12.000 T SO<sub>x</sub>  
2.500 T NO<sub>x</sub>  
1.200 T partículas  
+ alto impacto en mina

**Deben Dispersarse**  
(en la atmósfera)

¿ ?  
transporte

¿ ?  
transporte

### Nuclear (600 MW<sub>e</sub>)

**Alimentación**  
16.3 T

**Desechos anuales**  
16 T (½ T) HLW  
180 T ILW  
280 T LLW  
+ bajo impacto en mina

**Pueden Confinarse**  
(en depósitos estables)

# Centrales Nucleares



## Qué significa 600 MW de energía fósil



**4** viajes-año del **Knock Davis** (ULCC, 564.000 DWT).

**6** viajes-año del **Berge Stahl** (OBC de 365.000 DWT).

**8** viajes-año de un **LNGC** (Hay 182)

**200** viajes-año de tren (90 carros)



# Centrales Nucleares



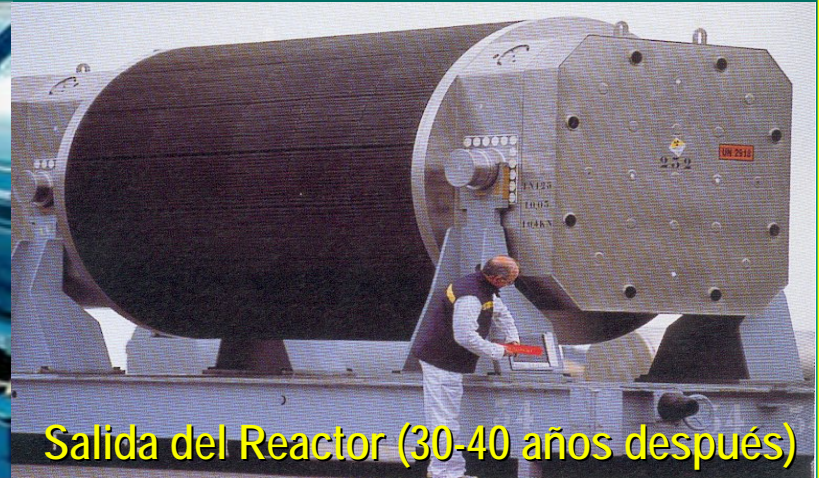
## Qué significa 600 MW de energía nuclear



2 camiones con 30 elementos combustibles (16 ton. uranio).

o

1 camioneta con deuterio (30 kg) de y tritio (40 kg) para **fusión**.



# Centrales Nucleares

## Desechos nucleares: pocos pero ruidosos





# Aplicación a Chile



**Chile: creciente economía en una región compleja**

**País más competitivo de la Región**

Marco macro-económico fuerte, buen estándar de vida, bajo índice de riesgo, abierto al mundo, bajo nivel de inflación, etc.

Para seguir siendo competitivos, debemos crecer **~6+%** al año, lo que demanda: **Energía y Potencia, Base y Punta, Limpia y Barata.**



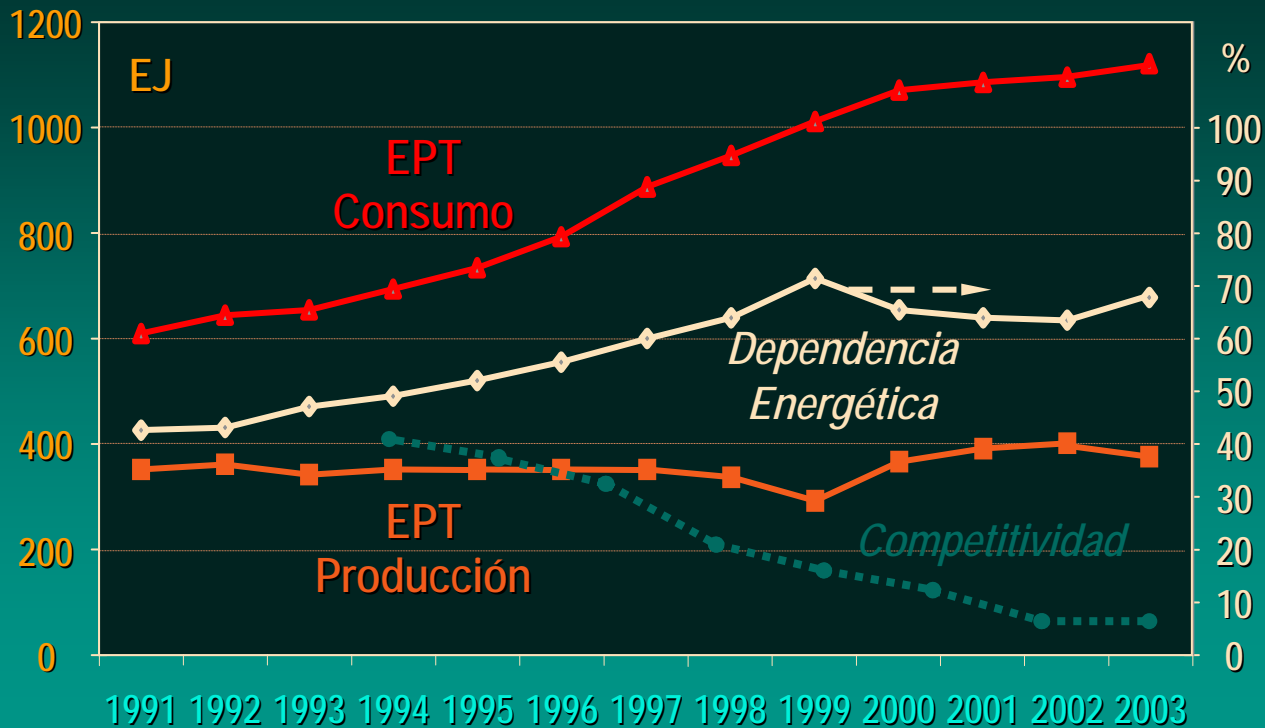


# Aplicación a Chile



## Lo que aumenta la dependencia energética

### Energía Primaria Total







# Aplicación a Chile



## Con pocos recursos nacionales (oferta)

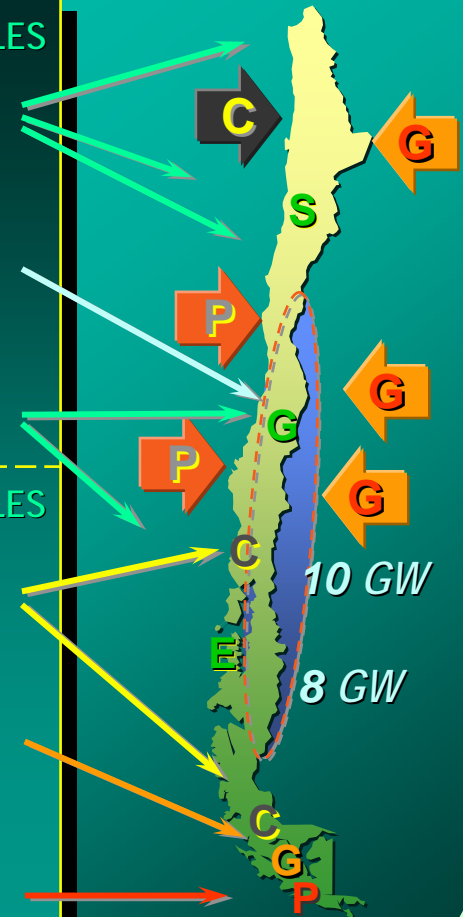
- **Uranio:**
  - 10% explorado, y pocos recursos evaluados
- **Hidroelectricidad:**
  - Utilizados 5 GW<sub>e</sub> de un Potencial de 20+ GW<sub>e</sub>
- **Otros Renovables:**
  - Oferta variable, según tecnología, 2+ GW<sub>e</sub>

---

- **Carbón:**
  - Poco energéticos y caros, 80% externo
- **Gas Natural:**
  - Pocas reservas en Magallanes, 80% externo
- **Petróleo:**
  - Pocas reservas probadas, 94% externo

SOSTENIBLES

NO SOSTENIBLES





# Aplicación a Chile



## Gran disponibilidad de recurso nuclear natural

### En el Mundo:

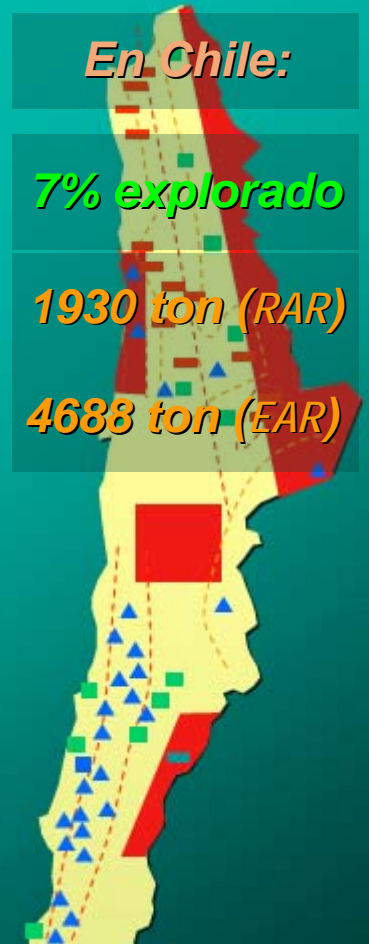
Tipo de Combustible	Recursos conocidos	Recursos totales
U (LWR), uso actual	320 años	8.300 años
U (LWR), reciclaje	370 años	9.400 años
U (LWR) + Pu (FBR)	500 años	12.500 años
U-Th (FBR), reciclaje	17.000 años	35.000 años
Pu-Th (FBR), reciclaje	10.000 años	250.000 años
D-T ó D-D (Fusión)	~inagotable	inagotable

### En Chile:

7% explorado

1930 ton (RAR)

4688 ton (EAR)





# Aplicación a Chile



## Generación eléctrica: 4 sistemas independientes

6% #    11% PIB    3640 MW<sub>e</sub>    (100% fósil)

**SING**

92% #    86% PIB    7700 GW<sub>e</sub>    (60% hidro)

**SIC**

0.6% #    0.5% PIB    34 MW<sub>e</sub>    (65% hidro)

**SA**

1% #    2% PIB    78 MW<sub>e</sub>    (100% fósil)

**SM**





# Aplicación a Chile



**Hay nuevas condiciones para la energía nuclear**

Se prevé una **Oferta** de nuevos reactores avanzados, más seguros, eficientes, flexibles y más competitivos:

- Reactores de gran tamaño, 1000-1600 MW, *i.e. AP1000, EPR, ESBWR, ACR1000, etc.*, disponibles en general ahora.
- Reactores de menor tamaño, 100-350 MW, *i.e. SMART, PBMR, GTMHR, IRIS, etc.* disponibles en general a contar del 2010.



# Aplicación a Chile



## Algunos reactores “evolutivos” disponibles

Nombre	Potencia	Fecha	Diseñador	País
<b>Tipo PWR</b>				
EPR	1600 MWe	2004	AREVA	Francia
APR1400	1400 MWe	2007	KHNP	Corea
AP1000	1114 MWe	2006	West-Tosh.	EUA-Japón
KSNP	1000 MWe	2006	KHNP	Corea
<b>Tipo BWR</b>				
ESBWR	1560 MWe	2006	GE	EUA
SWR	1200 MWe	2006	AREVA	Francia



# Aplicación a Chile



## Algunos reactores “innovativos” en desarrollo

Nombre	Potencia	Fecha	Diseñador	País
<b>Tipo PWR</b>				
IRIS	335 MWe	2014	West-Tosh.	EUA-Japón
CAREM	300 MWe	2020	CNEA	Argentina
SMART	200 MWe	2012	KHNP	Corea
<b>Tipo HTGR</b>				
GT-MHR	288 MWe	2015	GA	EUA
HTR-PM	190 MWe	2013	INET	China
PBMR	165 MWe	2012	PBMR	Sudáfrica



# Aplicación a Chile

## Opciones de ingreso en Chile

### I) Con centrales Evolutivas:



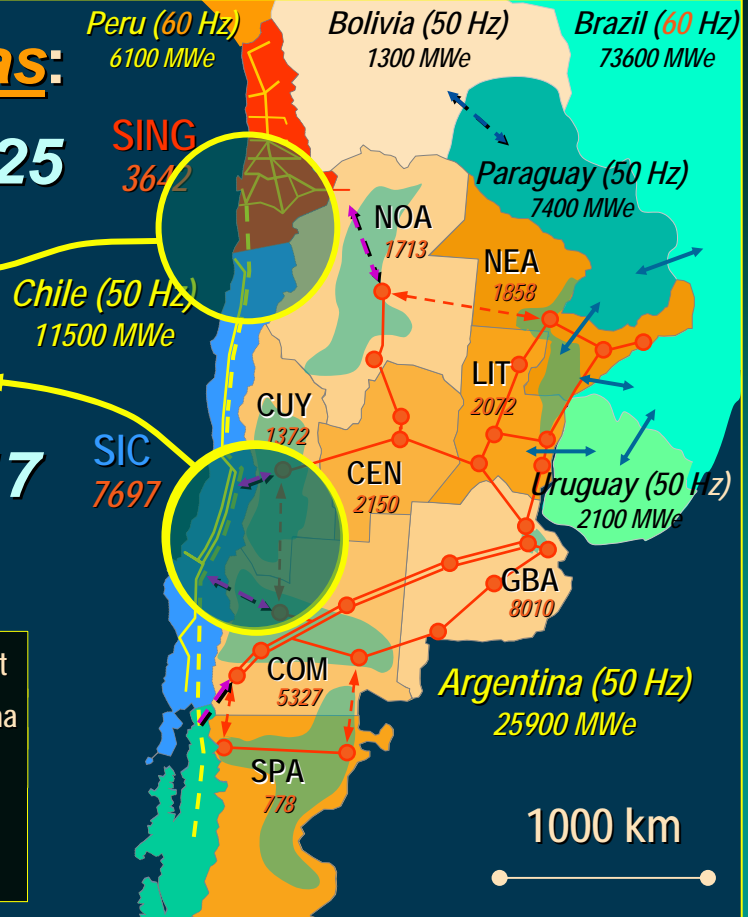
**SING-SIC** → 2015

**SIC-SADI** → 2014

**SIC** → 2017

**SING** → 2025

- Posible IC Chile-Argent
- Futura Red IC Argentina
- Red IC Argentina
- Posible Red Chilena
- Red Chilena Actual



1000 km

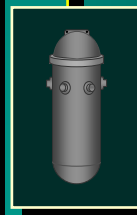
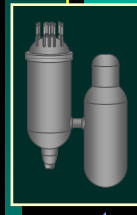


# Aplicación a Chile



## Opciones de ingreso en Chile

### II) Con centrales Innovativas:







# Aplicación a Chile



## Ajuste entre Tecnologías y mercados

	Tecnologías	Unidades Clásicas	Unidades Evolutivas	Unidades Innovativas
<b>Mercados</b>	<i>Potencia Reactor</i> <i>Potencia Sistema</i>	$P_U$ : Alrededor de 900 MW	$P_U$ : Más de 1200 MW	$P_U$ : Menos de 350 MW
<b>SING</b>	$P_{inst}$ : 3596 MW $P_{max}$ : 1570 MW $P_{min}$ : 1480 MW	$T_{reg}$ : 2021	$T_{reg}$ : 2025	$T_{reg}$ : 2018
<b>SIC</b>	$P_{inst}$ : 8297 MW $P_{max}$ : 5760 MW $P_{min}$ : 2550 MW	$T_{reg}$ : 2020	$T_{reg}$ : 2020	$T_{reg}$ : 2018

Plazo mínimo, si se inician actividades el 2010:

**2018 (reactores innovativos)**

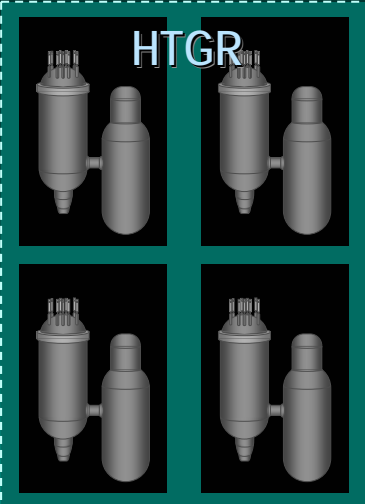
**2020 (reactores evolutivos)**



# Aplicación a Chile

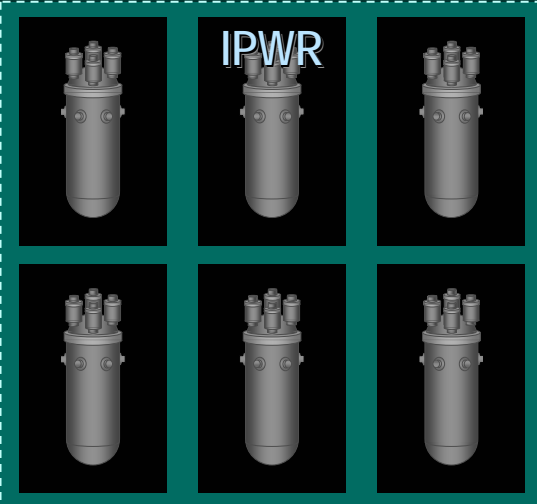
## Escenario hipotético para Chile, en el año 2025-30

**SING** ~800 MW<sub>e</sub> Gas Nat:



**40%**  
**Carbón:**  
**44%**  
**Hidro:**  
**1%**  
**Renov:**  
**5%**  
**Nuclear:**  
**10%**

**SIC** ~2000 MW<sub>e</sub> Gas Nat:



**15%**  
**Carbón:**  
**10%**  
**Hidro:**  
**60%**  
**Renov:**  
**5%**  
**Nuclear:**  
**10%**

